

US Patent Application based on PCT/EP2004/006263"Plasma-based generation of X-radiation5 with a sheet-shaped target material"**Summary of DE 102 33 634**

10 DE 102 33 634 discloses a target material for plasma-based generation of X-rays. The target material consists of at least one hydrocarbon, which comprises a polymer being liquid at room temperature. The polymer includes at least one ether bond between carbon atoms, e. g. a partially fluorinated or perfluorinated, polymeric hydrocarbon ether. Furthermore, a
15 method for plasma-based generation of X-rays and a corresponding X-ray source using this target material are described.

20 DE 102 33 634 represents technological background with regard to the plasma-based generation of X-rays with a liquid target material. DE 102 33 634 does not disclose to provide the target material with a predetermined surface curvature as claimed in the above U.S. patent application.

THIS PAGE BLANK (USPTO)



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 102 33 634 A1** 2004.03.04

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **102 33 634.2**
(22) Anmeldetag: **24.07.2002**
(23) Offenlegungstag: **04.03.2004**

(51) Int Cl.⁷: **H05G 2/00**

(71) Anmelder:
**Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der
Wissenschaften e.V., 80539 München, DE;
Georg-August-Universität Göttingen, 37075
Göttingen, DE**

(74) Vertreter:
v. Bezold & Sozien, 80799 München

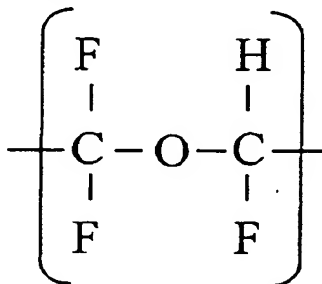
(72) Erfinder:
**Faubel, Manfred, Dr., 37124 Rosdorf, DE; Charvat,
Ales, Dr., 37077 Göttingen, DE; Troe, Jürgen, Prof.
Dr., 37085 Göttingen, DE**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Plasma-basierte Erzeugung von weicher Röntgenstrahlung mit einem flüssigen Targetmaterial**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Targetmaterial, insbesondere zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung, beschrieben, das aus mindestens einer Kohlenwasserstoffverbindung besteht, die ein bei Raumtemperatur flüssiges Polymer umfasst. Das Polymer enthält mindestens eine Etherbindung zwischen Kohlenstoffatomen. Es umfasst z. B. einen partiell fluorierten oder perfluorierten, polymeren Kohlenwasserstoffether. Es werden auch ein Verfahren zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung und eine entsprechende Röntgenquelle beschrieben.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft Targetmaterialien zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1, und Verfahren und Röntgenquellen zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung.

[0002] Es ist bekannt, Röntgenstrahlung als Bremsstrahlung mit einem kontinuierlichen Spektrum oder als Röntgenfluoreszenzstrahlung mit einem Linienspektrum zu erzeugen. Die Bremsstrahlung entsteht durch Energieumwandlung beim Aufprall von Elektronen auf Materie. Die Röntgenfluoreszenzstrahlung wird nach energetischer Anregung durch Übergänge der kernnächsten, inneren Elektronen der Atomhülle zurück in einen niedriger liegenden Zustand abgestrahlt. Je nach Anwendung werden Röntgenstrahlen bisher bspw. mit Röntgenröhren oder Elektronenbeschleunigern erzeugt. Wenn für bestimmte Aufgaben, z. B. in der Röntgenspektroskopie, chemischen Analytik oder Halbleitertechnologie Röntgenfluoreszenzstrahlung mit bestimmten Spektrallinien benötigt wird, stellen Elektronenbeschleuniger- oder Synchrotronanlagen an sich universell einsetzbare Röntgenquellen dar. Sie besitzen jedoch den Nachteil eines extremen gerätetechnischen Aufwandes. Elektronenbeschleuniger sind als flexible, im Labor oder in der Produktion anwendbare Röntgenquellen ungeeignet.

[0003] Eine Alternative stellen Röntgenquellen dar, mit denen durch hochenergetische Bestrahlung (z. B. Laser-Bestrahlung) ein Targetmaterial in einen Plasmazustand versetzt wird, in dem materialspezifisch Röntgenfluoreszenzstrahlung abgestrahlt wird. Erste Entwicklungen erfolgten mit festen, schichtförmigen Targetmaterialien, die sich jedoch wegen des bei jeder Plasmaanregung erfolgenden Materialverbrauchs für praktische Anwendungen als ungeeignet erwiesen haben. Eine Verbesserung wurde durch Verwendung flüssiger, tropfenförmiger Targetmaterialien erzielt. Bspw. wird gemäß EP 186 491 in einer evakuierten Kammer mit einem piezoelektrischen Tropfengeber eine Folge von flüssigen Tropfen erzeugt, die jeweils durch Laserbestrahlung in einen Plasmazustand überführt werden. Aus dem Plasmazustand erfolgt die Emission weicher Röntgenstrahlung, die durch ein Fenster in der Kammer aus tritt. Durch die Verwendung flüssiger Targetmaterialien wurde ein erheblicher Fortschritt erzielt, da mobile Röntgenquellen zur Erzeugung von Röntgenfluoreszenzstrahlung mit geringem gerätetechnischem Aufwand verfügbar wurden. Diese Röntgenquellen besitzen bislang jedoch eine Reihe von Nachteilen, die je nach Anwendung toleriert oder durch besondere Maßnahmen kompensiert werden.

Stand der Technik

[0004] Die Röntgenquelle gemäß EP 186 401 ist auf die Verwendung von Quecksilber als flüssiges Tar-

getmaterial beschränkt. Entsprechend ist die generierbare Röntgenstrahlung auf bestimmte Spektrallinien eingegrenzt. Ein weiterer Nachteil von Quecksilber ist dessen relativ hoher Dampfdruck, der Probleme beim Auffangen des Quecksilbers und Verunreinigungen in der Kammer verursacht. Flüssige Metalle sind generell unverträglich mit den empfindlichen und extrem kostenintensiven Röntgenoptiken. So können auf Goldoptiken, die z. B. in der Fresnelzonen-Röntgenmikroskopie Standard sind, Schäden durch Quecksilberamalga-Verbindungen entstehen. Zur Vermeidung von Verunreinigungen wird in US 5 459 771 vorgeschlagen, als Targetmaterial gefrorene Wasserkristalle zu verwenden. Diese Technik besitzt jedoch den Nachteil eines großen gerätetechnischen Aufwandes bei der Erzeugung der Kristalle und beim Auffangen des Targetmaterials.

[0005] Weitere flüssige Targetmaterialien wurden insbesondere für Anwendungen in der Röntgenlithographie vorgeschlagen. Von L. Rymell et al. wird in "Rev. Sci. Instrum." Band 66, 1995, Seite 4916-4920 die Verwendung von Ethanol als flüssiges Targetmaterial beschrieben. Ethanol oder andere monomere Flüssigkeiten besitzen jedoch den Nachteil, dass durch die Plasmaanregung Targetmoleküle in die Gasphase gelangen und sich auf Oberflächen empfindlicher Komponenten ablageren. Die abgelagerten Moleküle werden von der erzeugten Röntgenstrahlung zersetzt, wobei im Fall von Alkoholen teeartige Zersetzungsprodukte entstehen, die sich als unerwünschte Verunreinigungen in der Röntgenquelle und insbesondere auf optischen Bauteilen niederschlagen. Zur Verringerung dieser strahlungsinduzierten Zersetzungen ist eine Abschirmung mit einem Gasstrahl vorgesehen, durch die der Aufbau jedoch nachteilig verkompliziert wird. Neben Ethanol werden gemäß WO 97/40650 Ammoniak, Wasser oder fluorhaltige Flüssigkeiten als Targetmaterial verwendet. Um einem weiteren generellen Nachteil herkömmlicher flüssiger Targetmaterialien, nämlich der erschwerten Tropfenbildung in Folge geringer Viskosität, zu begegnen, wird in WO 97/40650 vorgeschlagen, das Targetmaterial in Form eines dünnen Strahls in die Kammer der Röntgenquelle einzuführen. Allerdings wird auch bei dieser Technik monomeres Targetmaterial verwendet, so dass es zu den oben genannten Problemen durch strahlungsinduzierte Zersetzungen von Niederschlägen kommt. Die Verwendung von Wasser als Targetmaterial ist auch aus US 6 377 651 bekannt. In US 6 324 255 wird vorgeschlagen, Stickstoff, Kohlendioxid, Krypton oder Xenon als Targetmaterial zu verwenden.

[0006] Von L. Malmqvist et al. wird in "Appl. Phys. Lett." Band 68, 1996, Seite 2627-2629 die Verwendung fluorierter Kohlenwasserstoffverbindungen (C_nF_m) vorgeschlagen. Diese sind zwar gut an die Generierung von Fluor-Linien ($\lambda \approx 1-2$ nm) angepasst, besitzen jedoch auch mehrere Nachteile. Erstens besitzen die sogenannten Perfluor-Kohlenwasserstoffe einen hohen Dampfdruck, der die Bildung

eines Flüssigkeitsstrahls und das Auffangen des Targetmaterials nach der Plasmaanregung erschwert. Bspw. beträgt der Dampfdruck von Perfluoropentan bei 0°C schon 0.3 bar. Des Weiteren ist insbesondere bei Anwendungen im Bereich der Röntgenspektroskopie auch die Generierung weiterer, langwelligerer Linien, wie z. B. die Generierung von Kohlenstoff-Emissionen von Interesse. Hierfür werden bisher jedoch Alkohole als Target verwendet (Rymell et al., siehe oben).

Aufgabenstellung

[0007] Die Aufgabe der Erfindung ist es, ein verbessertes Targetmaterial zur plasma-basierten Röntgenstrahlerzeugung (insbesondere weiche Röntgenstrahlung oder extreme W-Strahlung) bereitzustellen, mit dem die Nachteile herkömmlicher Targetmaterialien überwunden werden. Das Targetmaterial soll insbesondere die herkömmlichen Probleme bei der Tropfenbildung und beim Auffangen des Targetmaterials lösen und die Erzeugung von Verunreinigungen vermeiden. Eine weitere Aufgabe der Erfindung ist es, ein verbessertes Verfahren zur Erzeugung von Röntgenstrahlung bereitzustellen, mit dem die Nachteile der herkömmlichen Techniken überwunden werden. Schließlich ist es auch eine Aufgabe der Erfindung, eine verbesserte Röntgenquelle bereitzustellen, die unter Verwendung des erfindungsgemäßen Targetmaterials betrieben wird.

[0008] Diese Aufgaben werden durch ein Targetmaterial, ein Verfahren und eine Röntgenquelle mit den Merkmalen gemäß den Patentansprüchen 1, 10 und 20 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen und Anwendungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

[0009] Eine Grundidee der Erfindung ist es, ein Targetmaterial zur Erzeugung weicher Röntgenstrahlung bereitzustellen, das aus einer Kohlenwasserstoffverbindung besteht, die mindestens ein bei Raumtemperatur flüssiges Polymer umfasst. Die Verwendung flüssiger, polymerer Kohlenwasserstoffverbindungen besitzt eine Reihe von Vorteilen in Bezug auf die Bereitstellung des Targetmaterials in einer Röntgenquelle, die Vermeidung von Verunreinigungen und den Aufbau der Röntgenquelle, wie im Folgenden dargestellt wird.

[0010] Erstens ist das erfindungsgemäße Targetmaterial schwer flüchtig. Schwer flüchtige Substanzen können besonders einfach aus einer Vakuumkammer, in der das Plasma zur Strahlungserzeugung angeregt wird, entfernt werden. Die Substanzen können direkt als Flüssigkeit in einer Falle aufgefangen und dort unter ihrem eigenen Dampfdruck abgeschieden werden. Ein weiteres Vakuumsystem zur Evakuierung der Falle ist nicht zwingend erforderlich, so dass der Aufbau der Röntgenquelle erheblich vereinfacht wird.

[0011] Zweitens werden durch das erfindungsgemäße Targetmaterial Erosionsschäden in der Vaku-

umkammer vermindert. Die Erfinder haben festgestellt, dass Erosionsschäden durch ein Zusammenwirken der Gasatmosphäre, die sich durch den Dampfdruck eines flüssigen Targets immer ausbildet, und der generierten Röntgenstrahlung auftreten können. Durch die Strahlung werden in der Gasatmosphäre vorliegende Targetmoleküle ionisiert. Die Ablagerung der Ionen auf Oberflächen in der Vakuumkammer, z. B. auf Düsen zur Einbringung des Targetmaterials, bewirken eine Plasmaätzung, durch die das jeweilige Material erodiert wird. Das erfindungsgemäß polymere Targetmaterial ist schwer flüchtig, so dass die Teilchenkonzentration in der Gasatmosphäre und mögliche Erosionsschäden minimiert werden.

[0012] Drittens ist der Niederschlag von polymerem Targetmaterial in der Vakuumkammer unkritisch. Aus den Polymeren entstehen bei strahlungsinduzierter Zersetzung leicht flüchtige Produkte, die ohne Weiteres aus der Vakuumkammer abgepumpt werden können. Ein Targetmaterial-Niederschlag kann erfindungsgemäß sogar als Schutzfilm auf Komponenten der Vakuumkammer wirken, der verhindert, dass hochenergetische Polymerfragmente direkt auf die Komponenten gelangen, und ggf. bei einer Reinigung leicht entfernt werden kann.

[0013] Schließlich verbessern flüssige Polymere die Strahl- und Tropfenerzeugung in der Röntgenquelle. Ein durchgehender Strahl oder eine Tropfenfolge aus dem erfindungsgemäßen Targetmaterial ist über mehrere Millimeter stabil.

[0014] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung weist das flüssige Polymer mindestens eine Etherbindung zwischen Kohlenstoffatomen auf. Durch die Verwendung eines Kohlenwasserstoffs mit mindestens einer Etherbindung (oder Sauerstoffbrücke) werden Vorteile erzielt, die sich ebenfalls auf alle Phasen der plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung positiv auswirken. Die Sauerstoff-Brückenverbindungen zwischen Kohlenstoffatomen sind frei drehbar. Dies bewirkt eine hohe molekulare Flexibilität (oder: niedrige Viskosität) des Targetmaterials. Die niedrige Viskosität wirkt sich vorteilhaft sowohl auf die Tropfenbildung als auch auf den Zerfall in niedermolekulare Bestandteile nach der Plasmaanregung aus. Des Weiteren bewirkt die Zusammensetzung des Targetmaterials insbesondere aus Fluor, Kohlenstoff und Sauerstoff einen erweiterten Einsatzbereich des Targetmaterials. Es wird ein universelles Target für verschiedene Anwendungen bereitgestellt.

[0015] Besonders vorteilhaft ist es, wenn als Targetmaterial ein bei Raumtemperatur (rd. 20°C) flüssiges Polymer verwendet wird, das mindestens einen partiell fluorierten oder perfluorierten, polymeren Kohlenwasserstoffether umfasst. Die teilweise oder vollständige Fluorierung des Polymers fördert die Bildung leicht flüchtiger Zersetzungsprodukte bei Röntgenbestrahlung.

[0016] Vorzugsweise wird als Targetmaterial ein Perfluoropolyether (PFPE) oder eine Mischung aus

mehreren Perfluorpolyethern verwendet. PFPE-Verbindungen sind hochmolekular, wodurch die Strahl- und Tropfenerzeugung weiter begünstigt wird. Des Weiteren zersetzen sie sich durch Aufbrechen von Sauerstoff-Brücken bei Energiezufuhr, insbesondere nach Anregung des Plasmazustandes in leicht flüchtige Verbindungen, die leicht abgepumpt werden können. Dadurch werden Ablagerungen und Verschmutzungen, insbesondere an optischen Komponenten in der Röntgenquelle vermieden. Mit der Erfindung werden vorteilhafterweise die teuren und empfindlichen Röntgenoptiken geschützt. Nicht zersetzte Reste des Targetmaterials können besonders einfach auch im Vakuum ohne besondere Vorkehrungen zur Kondensation aufgefangen werden.

[0017] Gemäß bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung besitzt das Targetmaterial einen Dampfdruck, der bei Raumtemperatur geringer als 10 mbar, vorzugsweise geringer als 1 mbar, z. B. 10^{-6} mbar, ist, ein Molekulargewicht größer als 100 g/mol, vorzugsweise größer als 300 g/mol, z. B. im Bereich 400 bis 8000 g/mol, und/oder bei Raumtemperatur eine Viskosität, die im Bereich von 1 bis 1800 cS gewählt ist. Die Massendichte des Targetmaterials liegt vorzugsweise im Bereich von 1.5 bis 2.5 g/mol, z. B. 1.8 bis 1.9 g/mol. Durch diese, ggf. in Kombination bereitgestellten Parameter wird die Tropfenbildung des Targetmaterials und das Auffangen von Materialresten nach der Plasmaanregung verbessert.

[0018] Ein weiterer Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren zur Erzeugung von weicher Röntgenstrahlung, bei dem das oben charakterisierte Targetmaterial in Strahl- oder Tropfenform verwendet wird.

[0019] Die Bestrahlung des Targetmaterials erfolgt gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens in einer Umgebung bei einem Druck, der größer als der Gasdruck des bei der Bestrahlung freigesetzten Materials ist. Durch die Erhöhung des Druckes in der Vakuumkammer auf den Dampfdruck des Targetmaterials wird eine lokale Übersättigung bei der Plasmaerzeugung und damit eine Tröpfchenbildung in der Vakuumkammer vermieden. In diesem Fall verbleibt das freigesetzte Gas größtenteils in der Gasphase. Die Abführung aus der Vakuumkammer erfolgt durch Pumpen. Vorteilhafterweise werden somit an die Vakuumbedingungen in der Kammer einer Röntgenquelle verminderte Anforderungen gestellt, so dass das Verfahren mit geringerem gerätetechnischem Aufwand durchgeführt werden kann.

[0020] Ein weiterer Gegenstand der Erfindung ist eine Röntgenquelle, die unter Verwendung des oben charakterisierten Targetmaterials betrieben wird. Die Röntgenquelle zeichnet sich insbesondere durch mindestens eine Heizeinrichtung aus, mit der zumindest Teile der Vakuumkammer temperierbar sind. Mit der Heizeinrichtung ist der Dampfdruck des Targetmaterials höher als der Druck des Gases einstellbar, das durch die Bestrahlung des Targetmaterials freigesetzt wird. Durch eine Temperaturerhöhung kann

der Dampfdruck erhöht werden, was Vorteile für den Aufbau der Vakuumeinrichtung und die Verminderung von Niederschlägen liefert.

[0021] Wenn die Röntgenquelle mit einer in der Vakuumkammer angeordneten Bestrahlungsoptik zur Bestrahlung des Targetmaterials ausgestattet ist, kann es von Vorteil sein, eine Heizeinrichtung mit der Bestrahlungsoptik zu verbinden, so dass auf dieser Niederschläge des Targetmaterials vermieden werden. Durch Erhöhung der Effektivität der Bestrahlung und Plasmaerzeugung steigt der Wirkungsgrad der Röntgenquelle. Wenn die Bestrahlungsoptik außerhalb der Vakuumkammer angeordnet ist, kann vorteilhafterweise auf eine gesonderte Heizeinrichtung an der Bestrahlungsoptik verzichtet werden. Es ergibt sich ein vereinfachter Aufbau der Röntgenquelle.

[0022] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist die Röntgenquelle mit einer Sammeleinrichtung zum kühlmittelfreien Auffangen von Targetmaterialresten ausgestattet. Die erfindungsgemäße Röntgenquelle besitzt den Vorteil eines vereinfachten Aufbaus. Durch die Stabilität des Strahls oder der Tropfenfolge des Targetmaterials wird die Justierung einer Bestrahlungseinrichtung zur Anregung des Plasmazustands vereinfacht. Durch den Einsatz einer einfachen Vakuumanlage und die Vermeidung einer aufwendigen Kühleinrichtung ist die Röntgenquelle als mobiles Gerät für einen erweiterten Anwendungsbereich in Laboratorien und in der Industrie geeignet.

[0023] Gemäß einer bevorzugten Anwendung der Erfindung wird die Röntgenquelle mit einer Röntgenlithographieeinrichtung, z. B. zur Strukturierung von Halbleiteroberflächen kombiniert. Hierbei kann die Röntgenlithographieeinrichtung in der Vakuumkammer in unmittelbarer Nähe des Ortes der Röntgenstrahlungserzeugung angeordnet werden. Dies ist im Unterschied zu den herkömmlichen Systemen wegen der geringen Tröpfchenbildung und verminderten Niederschläge des erfindungsgemäß verwendeten Targetmaterials erstmalig möglich. Die Röntgenquelle kann umgekehrt direkt in eine Röntgenlithographieeinrichtung integriert werden. Vorzugsweise ist die Röntgenlithographieeinrichtung mit einer eigenen Heizeinrichtung ausgestattet, so dass ggf. auftretende Rest-Niederschläge leicht in die Gasphase überführt und abgepumpt werden können.

[0024] Gemäß einer abgewandelten Ausführungsform der Erfindung kann die Vakuumkammer der Röntgenquelle mit einer zusätzlichen Vakuumkammer kombiniert werden, die die Röntgenlithographieeinrichtung enthält. Durch den vereinfachten Aufbau der erfindungsgemäßen Röntgenquelle können beide Vakuumkammern auf engem Raum angeordnet werden.

[0025] Die erfindungsgemäße Röntgenquelle besitzt den besonderen Vorteil, dass Röntgenstrahlung (oder entsprechend Strahlung im fernen UV-Bereich) bei dauerhaftem Betrieb erzeugt werden kann. Die Anlage kann praktisch ununterbrochen (z. B. über Ta-

ge) arbeiten, was besonders wichtig für industrielle Anwendungen der Röntgenquelle ist.

Ausführungsbeispiel

[0026] Weitere Einzelheiten und Vorteile der Erfindung werden im Folgenden unter Bezug auf die beigefügten Zeichnungen beschrieben. Es zeigen:

[0027] **Fig. 1** und **2**: Strukturformeln zur Charakterisierung des erfindungsgemäß verwendeten Targetmaterials, und

[0028] **Fig. 3** bis **6**: schematische Darstellungen von Ausführungsformen einer erfindungsgemäßen Röntgenquelle.

[0029] Das erfindungsgemäß in einer Plasma-Röntgenquelle verwendete Targetmaterial basiert vorzugsweise auf einer bei Raumtemperatur flüssigen, polymeren Kohlenwasserstoffverbindung, insbesondere mit mindestens einer Etherbindung. Ein Baustein einer derartigen Kohlenwasserstoffverbindung ist beispielhaft in **Fig. 1** illustriert. Es wird betont, dass die Umsetzung der Erfindung nicht auf die illustrierten Beispiele beschränkt ist. Alternativ zu fluorierten Polyethern können erfindungsgemäß allgemein auch nicht-fluorierte Polymere, Gemische aus fluorierten und nicht-fluorierten Polymeren oder Polymere mit einem geringem Lösungsmittel-Anteil (kleiner als 20 Vol.-%) verwendet werden. Ferner kann die Fluorierung zumindest teilweise durch eine andere Halogenierung, insbesondere eine Chlorierung ersetzt werden.

[0030] Das in **Fig. 1** beispielhaft gezeigte Targetmaterial besteht aus einer Vielzahl derartig oder entsprechend aus C, F, O und ggf. H aufgebauten Bausteinen, so dass ein schwerflüchtiges Polymer gebildet wird. Die Verwendung des schwerflüchtigen Polymers vermindert vorteilhafterweise die Anforderungen an das Vakuumsystem einer Röntgenquelle.

[0031] Das Targetmaterial bildet insbesondere einen partiell oder perfluorierten Polyether (PFPE) oder eine Mischung aus mehreren partiell fluorierten oder perfluorierten Polyethern. Ein Perfluorpolyether ist beispielhaft in **Fig. 2** illustriert. Zu dieser Substanzklasse gehören auch die PFPE-Verbindungen FOMBLIN (registrierte Marke) und GALDEN (registrierte Marke).

[0032] In **Fig. 3** ist ein Beispiel einer erfindungsgemäßen Röntgenquelle schematisch illustriert. Die Röntgenquelle umfasst eine Targetquelle **10**, die mit einer temperierbaren Vakuumkammer **20** verbunden ist, eine Bestrahlungseinrichtung **30** und eine Sammeleinrichtung **40**. Die Targetquelle **10** umfasst ein Reservoir **11** für das Targetmaterial, eine Zufuhrleitung **12** und eine Düse **13** (oder: eine Tröpfchenkanone **13**, siehe **Fig. 4**). Mit einer (nicht dargestellten) Betätigungseinrichtung, die bspw. eine Pumpe oder eine piezoelektrische Fördereinrichtung umfasst, wird Targetmaterial zur Düse oder Tröpfchenkanone **13** geführt und von dieser in Form eines Flüssigkeitsstrahls oder in Form von Tropfen **50** abgegeben und

in die Vakuumkammer **20** injiziert.

[0033] Die Bestrahlungseinrichtung **30** umfasst eine Strahlungsquelle **31** und eine Bestrahlungsoptik **32**, mit der Strahlung von der Strahlungsquelle **31** auf das Targetmaterial **50** fokussierbar sind. Die Strahlungsquelle **31** ist bspw. ein Laser, dessen Licht ggf. mit Hilfe von Umlenkspiegeln (nicht dargestellt) hin zum Targetmaterial gelenkt wird. Alternativ kann als Bestrahlungseinrichtung eine Ionenquelle oder eine Elektronenquelle vorgesehen sein, die mit in der Kammer **20** angeordnet ist.

[0034] Die Sammeleinrichtung **40** umfasst einen Aufnehmer **41** z. B. in Form eines Trichters oder einer Kapillare, der Targetmaterial, das nicht unter Einwirkung der Bestrahlung verdampft ist, aus der Vakuumkammer entfernt und in einen Sammelbehälter **42** leitet. Wegen der Verwendung des flüssigen Polymers als Targetmaterial kann die gesammelte Flüssigkeit vorteilhafterweise ohne weitere Maßnahmen im Sammelbehälter **42** aufgefangen werden. Um ggf. die Gefahr eines Rückstroms von gesammeltem Targetmaterial in die Vakuumkammer **20** zu vermeiden, kann eine Kühlung des Sammelbehälters **42** mit einer Kühleinrichtung (nicht dargestellt) und/oder eine Vakuumpumpe (nicht dargestellt) vorgesehen sein.

[0035] Die Vakuumkammer **20** umfasst ein Gehäuse **21** mit mindestens einem ersten Fenster **22**, durch das das Targetmaterial **50** bestrahlbar ist, und mindestens einem zweiten Fenster **23**, durch das die generierte Röntgenstrahlung austritt. Das zweite Fenster **23** ist optional vorgesehen, um die generierte Röntgenstrahlung aus der Vakuumkammer **20** für eine bestimmte Anwendung auszukoppeln. Falls dies nicht erforderlich ist, kann auf das zweite Fenster **23** verzichtet werden (siehe unten). Die Vakuumkammer **20** ist ferner mit einer Vakuumeinrichtung **24** verbunden, mit der in der Kammer **20** ein Unterdruck erzeugt wird. Dieser Unterdruck liegt vorzugsweise unterhalb von 10^{-5} mbar. Die Bestrahlungsoptik **32** ist ebenfalls in der Vakuumkammer **20** angeordnet.

[0036] Die Vakuumkammer **20** ist mit einer Heizeinrichtung **60** ausgestattet, die einen oder mehrere Thermostaten **61** bis **63** umfasst. Mit den Thermostaten sind das Gehäuse **21**, der Aufnehmer **41** und/oder die Bestrahlungsoptik **32** temperierbar. Ggf. kann auch die Targetquelle **10** temperiert werden. Ein Thermostat umfasst beispielsweise eine an sich bekannte Widerstandsheizung.

[0037] Die mit der Heizeinrichtung **60** eingestellte Temperatur wird so gewählt, dass der Dampfdruck des Targetmaterials den Gasdruck übersteigt, der durch Bestrahlung des Targetmaterials **50** mit der Bestrahlungseinrichtung **30** gebildet wird. Dadurch wird erfindungsgemäß eine Übersättigung der Gasphase in der Vakuumkammer vermieden. Das freigesetzte Polymer bleibt gasförmig und kann nahezu quantitativ mit der Vakuumeinrichtung **24** abgepumpt werden.

[0038] Das zweite Fenster **23** besteht aus einem für weiche Röntgenstrahlung transparenten Fenstermaterial, z. B. aus Beryllium. Wenn das zweite Fenster

23 vorgesehen ist, kann sich eine evakuierbare Bearbeitungskammer 26 anschließen, die mit einer weiteren Vakuumeinrichtung 27 verbunden ist. In der Bearbeitungskammer 26 kann die Röntgenstrahlung zur Materialbearbeitung auf ein Objekt abgebildet werden. Es ist bspw. eine Röntgenlithographieeinrichtung 70 vorgesehen, mit der die Oberfläche eines Halbleitersubstrats bestrahlt wird. Die räumliche Trennung der Röntgenquelle in der Vakuumkammer 20 und der Röntgenlithographieeinrichtung 70 in der Bearbeitungskammer 26 besitzt den Vorteil, dass das zu bearbeitende Material nicht Ablagerungen von verdampftem Targetmaterial ausgesetzt wird.

[0039] Die Röntgenlithographieeinrichtung 70 umfasst bspw. einen Filter 71 zur Selektion der gewünschten Röntgen-Wellenlänge, eine Maske 72 und das zu bestrahlende Substrat 73. Zusätzlich können Abbildungsoptiken (bspw. Spiegel) vorgesehen sein, um die Röntgenstrahlung auf die Einrichtung 70 zu lenken.

[0040] Bei der abgewandelten Ausführungsform der Erfindung gemäß Fig. 4 ist die Röntgenlithographieeinrichtung 70 in der Vakuumkammer 20 angeordnet. Zur Vermeidung von Niederschlägen ist die Einrichtung 70 ebenfalls mit einem Thermostaten 64 verbunden. Des Weiteren illustriert Fig. 4 die Verwendung einer Tropfenkanone 13 anstelle der oben genannten Düse, wobei mit der Tropfenkanone eine Tropfenfolge erzeugt wird.

[0041] Wenn die Bestrahlungsoptik 32 gemäß Fig. 5 außerhalb der Vakuumkammer 20 angeordnet wird, kann vorteilhafterweise auf eine gesonderte Temperierung verzichtet werden. In diesem Fall muss allerdings das Fenster 22 ausreichend stabil in Bezug auf die zumindest teilweise fokussierte und ggf. hochrepetierende Strahlung der Strahlungsquelle 31 sein. Des Weiteren wird bei dieser Ausführungsform das Targetmaterial 50 relativ dicht (z. B. im Abstand von wenigen cm) am Fenster 22 vorbeigeführt. Auch bei dieser Ausführungsform kann eine Tröpfchenkanone anstelle der illustrierten Düse 13 verwendet werden.

[0042] Wenn flüssige Polymere als Targetmaterial verwendet werden, deren Dampfdruck so hoch ist, dass eine Temperierung des Gehäuses 21 nicht erforderlich ist, so sollten dennoch empfindliche Komponenten der Vakuumkammer 20, wie z. B. die Abbildungsoptik 32 oder die Einrichtung 70 geheizt werden. Diese Ausführungsform der Erfindung ist in Fig. 6 illustriert. Durch die lokale Heizung wird vorteilhafterweise erreicht, dass das bei der Bestrahlung freigesetzte Targetmaterial bevorzugt auf den kälteren Wänden des Gehäuses 21 abgesetzt wird. Die empfindlichen, für die jeweilige Anwendung wichtigen Komponenten werden geschont.

[0043] Zur erfindungsgemäßen Generation von Röntgenstrahlung werden mit der Targetquelle 10 ein Strahl oder Tropfen des Targetmaterials 50 erzeugt. Der Durchmesser des Strahls oder der Tropfen beträgt bspw. 10 µm bis 0.1 mm. Die Strecke, die das

Targetmaterial 50 im Vakuum zurücklegt, beträgt typischerweise einige mm bis einige cm. Es wird bspw. eine Tropfenfolge von 10^4 Tropfen je Sekunde generiert. Die Tropfen 50 werden mit der Bestrahlungseinrichtung 30 in an sich bekannter Weise bestrahlt. Die Bestrahlung erfolgt fokussiert mit einer derartigen Intensität, dass das Targetmaterial in einen Plasmazustand überführt wird. Im Plasmazustand wird weiche Röntgenstrahlung emittiert und zur ggf. jeweiligen Anwendung durch das zweite Fenster 23 ausgekoppelt.

[0044] Bei Verwendung hochrepetierender Laser als Strahlungsquelle kann eine intensive Röntgenstrahlung mit einer Ausgangsleistung im Bereich von rund 1 W bereitgestellt werden. Die Röntgenstrahlung umfasst einen Wellenlängenbereich von bis zu ungefähr 15 nm. Vorteilhafterweise werden insbesondere die Ka-Linie mit $\lambda = 3.37$ nm, F-Linien mit $\lambda = 0.7$ nm bis 1.7 nm und die O-Linie mit $\lambda = 13$ nm emittiert. Besonders vorteilhaft ist, dass die Kohlenstoff-Ka-Linie unter Vermeidung störender Graphitablagerungen generiert werden kann. In der Röntgenmikroskopie ist die Ka-Linie von starkem Interesse, da diese in das sogenannte "Wasserfenster" fällt, in dem keine Röntgenabsorption durch Wasser auftritt. Durch die dauerhafte Vermeidung von Erosionen und Ablagerungen ist die erfindungsgemäße Röntgenquelle für röntgenmikroskopische und -lithographische Anwendungen hervorragend geeignet. Ein weiterer Vorteil ist durch die Miniaturisierung des Aufbaus gegeben. Die Einrichtung 70 (siehe Fig. 4) kann in unmittelbarer Nähe des Fokus der Bestrahlungseinrichtung 30 angeordnet werden.

[0045] Die erfindungsgemäße Röntgenquelle wird bspw. mit den folgenden Parametern betrieben. Es wird mit der Bestrahlungseinrichtung 30 dem Targetmaterial pulsförmig eine Energie von 100 µJ pro Bestrahlungspuls (z. B. Laserschuss) zugeführt. Bei einer Pulsrate von 10 kHz wird eine Ausgangsleistung von 1 W erreicht. Falls pro Puls ein Volumen aus dem Targetstrahl verdampft wird, das einem Würfel der Kantenlänge 20 µm entspricht, wird bei einer Dichte von z. B. 2 g/ml des Targetmaterials pro Puls eine Masse von $2 \cdot 10^{-8}$ g verdampft. Bei der genannten Anregungsrate ergibt sich eine freigesetzte Masse von $2 \cdot 10^{-9}$ g/s. Bei einer Molmasse von 1000 g/mol ergibt sich eine Gasmenge von $2 \cdot 10^{-7}$ mol/s, die mit einer Sauggeschwindigkeit von rund 1000 1/s zur Aufrechterhaltung eines Vakuums von rund $5 \cdot 10^{-6}$ mbar abgeführt wird. Der Dampfdruck des Materials (z. B. 10^{-5} mbar) wird (ggf. durch Temperieren) so gewählt, dass er den Kammerdruck leicht übersteigt, so dass die oben genannte Tröpfchenbildung durch Übersättigung vermieden wird.

[0046] Wegen der geringen Flüchtigkeit des erfindungsgemäß verwendeten Materials kann die Sammeleinrichtung 40 vorteilhafterweise ohne ein Kühlmittel und ohne eine Kühleinrichtung betrieben werden. Es ist insbesondere nicht erforderlich, dass eine sogenannte Kryofalle oder ein Abscheider zum Kon-

densieren von Restmaterialien vorgesehen ist. Der Aufnehmer 41 und der Sammelbehälter 42 sind direkt miteinander verbunden.

[0047] Die nicht von der Sammeleinrichtung 40 erfassten Restmaterialien sind vorteilhafterweise leicht flüchtige Komponenten, die mit der Vakuumeinrichtung 24 aus der Kammer 20 entfernt werden können. Die Vakuumeinrichtungen 24, 27 umfassen bspw. Drehschieber-Ölpumpen.

[0048] Bevorzugte Anwendungen der erfindungsgemäßen Röntgenquelle bestehen in der analytischen Chemie, in der Röntgenmikroskopie, in der Röntgenlithographie und in der Kombination mit weiteren spektroskopischen Messverfahren, wie z. B. der fs-Spektroskopie.

[0049] Die Verwendung des erfindungsgemäßen Targetmaterials ist nicht auf Röntgenquellen mit freien Strahl- oder Tropfenquellen beschränkt, sondern auch bei anderen geometrischen Targetformen möglich.

Patentansprüche

1. Targetmaterial, insbesondere zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung, das aus mindestens einer Kohlenwasserstoffverbindung besteht, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kohlenwasserstoffverbindung mindestens ein bei Raumtemperatur flüssiges Polymer umfasst.

2. Targetmaterial nach Anspruch 1, bei dem die Kohlenwasserstoffverbindung mindestens eine Etherbindung zwischen Kohlenstoffatomen aufweist.

3. Targetmaterial nach Anspruch 1 oder 2, das mindestens einen partiell fluorierten oder perfluorierten, polymeren Kohlenwasserstoffether umfasst.

4. Targetmaterial nach Anspruch 3, das einen Perfluorpolyether oder eine Mischung aus Perfluorpolyethern umfasst.

5. Targetmaterial nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dessen Dampfdruck bei Raumtemperatur geringer als 10 mbar ist.

6. Targetmaterial nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dessen Molekulargewicht größer als 100 g/mol ist.

7. Targetmaterial nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dessen Viskosität im Bereich von 1 cS bis 1800 cS gewählt ist.

8. Verwendung von bei Raumtemperatur flüssigen, polymeren Kohlenwasserstoffverbindungen als Targetmaterial zur Erzeugung weicher Röntgenstrahlung.

9. Verwendung von partiell fluorierten oder perflu-

orienten, polymeren Kohlenwasserstoffethern als Targetmaterial zur Erzeugung weicher Röntgenstrahlung.

10. Verfahren zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung, bei dem ein flüssiges Targetmaterial (50), das aus mindestens einer fluorierten Kohlenwasserstoffverbindung besteht, bestrahlt wird, um einen Plasmazustand zu erzeugen, in dem die Röntgenstrahlung abgestrahlt wird, dadurch gekennzeichnet, dass als Targetmaterial (50) eine Kohlenwasserstoffverbindung verwendet wird, die mindestens ein bei Raumtemperatur flüssiges Polymer umfasst.

11. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem als Targetmaterial (50) eine Kohlenwasserstoffverbindung verwendet wird, die mindestens eine Etherbindung zwischen Kohlenstoffatomen aufweist.

12. Verfahren nach Anspruch 11, bei dem als Targetmaterial (50) mindestens ein partiell fluorierter oder perfluorierter, polymerer Kohlenwasserstoffether verwendet wird.

13. Verfahren nach Anspruch 12, bei dem als Targetmaterial (50) ein Perfluorpolyether oder eine Mischung aus Perfluorpolyethern verwendet wird.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 10 bis 13, bei dem ein Targetmaterial (50) verwendet wird, dessen Dampfdruck bei Raumtemperatur geringer als 10 mbar ist.

15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 10 bis 14, bei dem ein Targetmaterial (50) verwendet wird, dessen Molekulargewicht größer als 100 g/mol ist.

16. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 10 bis 15, bei dem ein Targetmaterial (50) verwendet wird, dessen Viskosität im Bereich von 1 cS bis 1800 cS gewählt ist.

17. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 10 bis 16, bei dem Tropfen des Targetmaterials (50) erzeugt werden, die zur Erzeugung des Plasmazustands bestrahlt werden.

18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 10 bis 17, bei dem die Bestrahlung des Targetmaterials (50) in einer Vakuumkammer (20) erfolgt, die zumindest lokal derart geheizt ist, dass der Dampfdruck des Targetmaterials (50) höher als der Druck des Gases ist, das durch die Bestrahlung des Targetmaterials (50) freigesetzt wird.

19. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 8 bis 15, bei dem Targetmaterial (50) nach der Bestrahlung in einer Sammeleinrichtung bei

Raumtemperatur aufgefangen wird.

20. Röntgenquelle zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung durch hochenergetische Bestrahlung eines flüssigen Targetmaterials (50) nach einem der Ansprüche 1 bis 7, die umfasst:

- eine Targetquelle (10), die in einer Vakuumkammer (20) das Targetmaterial (50) bereitstellt,
- eine Bestrahlungseinrichtung (30) zur Bestrahlung des Targetmaterials (50) in der Kammer, und
- einer Sammeleinrichtung (40) zum Auffangen des Targetmaterials (50) nach der Bestrahlung, dadurch gekennzeichnet, dass
- mindestens eine Heizeinrichtung (60) vorgesehen ist, mit der zumindest Teile der Vakuumkammer (20) temperierbar sind.

21. Röntgenquelle gemäß Anspruch 20, bei der die Heizeinrichtung (60) mehrere Thermostaten (61–64) umfasst, die mit Komponenten an und/oder in der Vakuumkammer (20) verbunden sind.

22. Röntgenquelle gemäß Anspruch 21, bei der die Bestrahlungseinrichtung eine Bestrahlungsoptik aufweist, die in der Vakuumkammer (20) angeordnet und mit einem Thermostaten (63) verbunden ist.

23. Röntgenquelle gemäß Anspruch 20, bei der die Bestrahlungseinrichtung eine Bestrahlungsoptik aufweist, die außerhalb der Vakuumkammer (20) angeordnet ist.

24. Röntgenquelle gemäß einem der Ansprüche 20 bis 23, bei der die Sammeleinrichtung zum kühlmittelfreien Betrieb eingerichtet ist.

25. Röntgenquelle gemäß einem der Ansprüche 20 bis 24, bei der in der Vakuumkammer (20) eine Röntgenlithographieeinrichtung (70) angeordnet ist.

26. Röntgenquelle gemäß Anspruch 25, bei der die Röntgenlithographieeinrichtung (70) mit einem Thermostaten (64) verbunden ist.

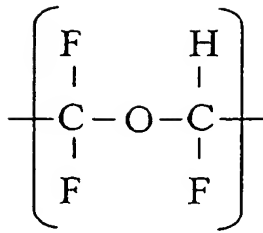
27. Röntgenquelle gemäß einem der Ansprüche 20 bis 24, bei der die Vakuumkammer (20) mit einer Bearbeitungskammer (26) verbunden ist, in der eine Röntgenlithographieeinrichtung (70) angeordnet ist.

28. Verwendung eines bei Raumtemperatur flüssigen Polymers, das aus mindestens einer Kohlenwasserstoffverbindung besteht, als Schutzfilm gegen Ionen- und/oder energiereiche Fragmente auf Komponenten, die sich in einer Röntgenquelle gemäß einem der Ansprüche 20 bis 27 befinden.

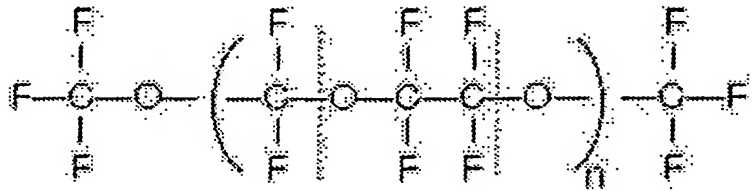
29. Verwendung gemäß Anspruch 28, bei dem das Polymer einen flüssigen, geschlossenen Schutzfilm bildet.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

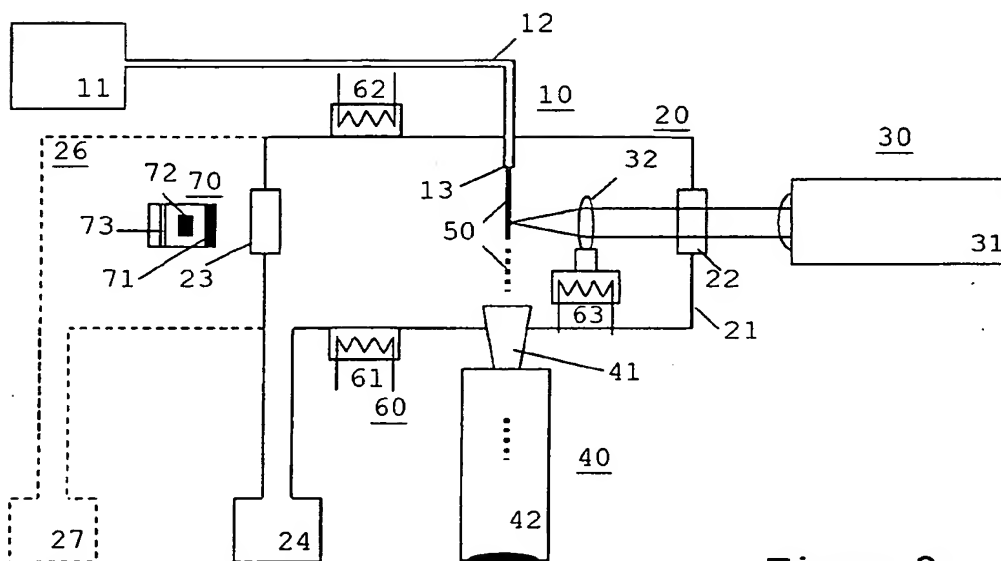
Anhängende Zeichnungen



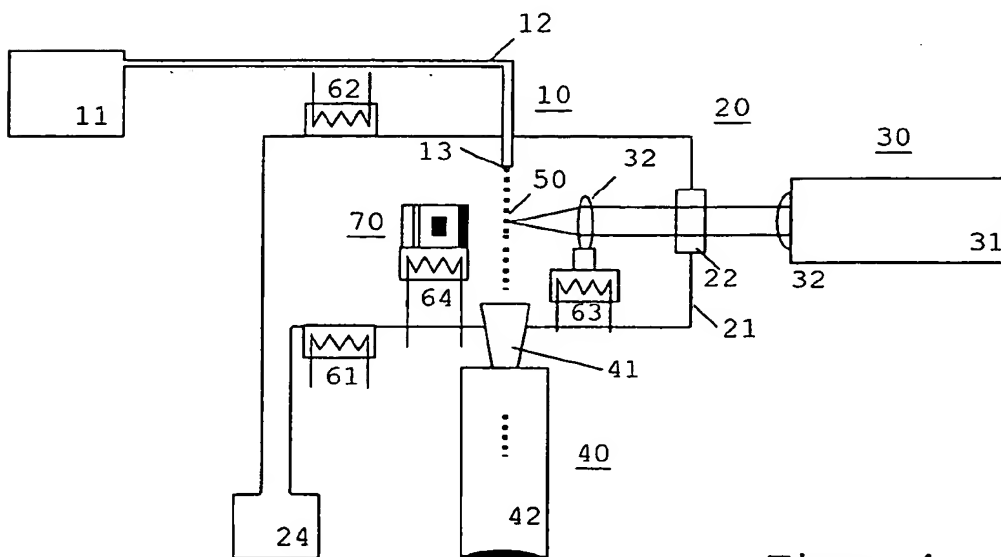
Figur 1



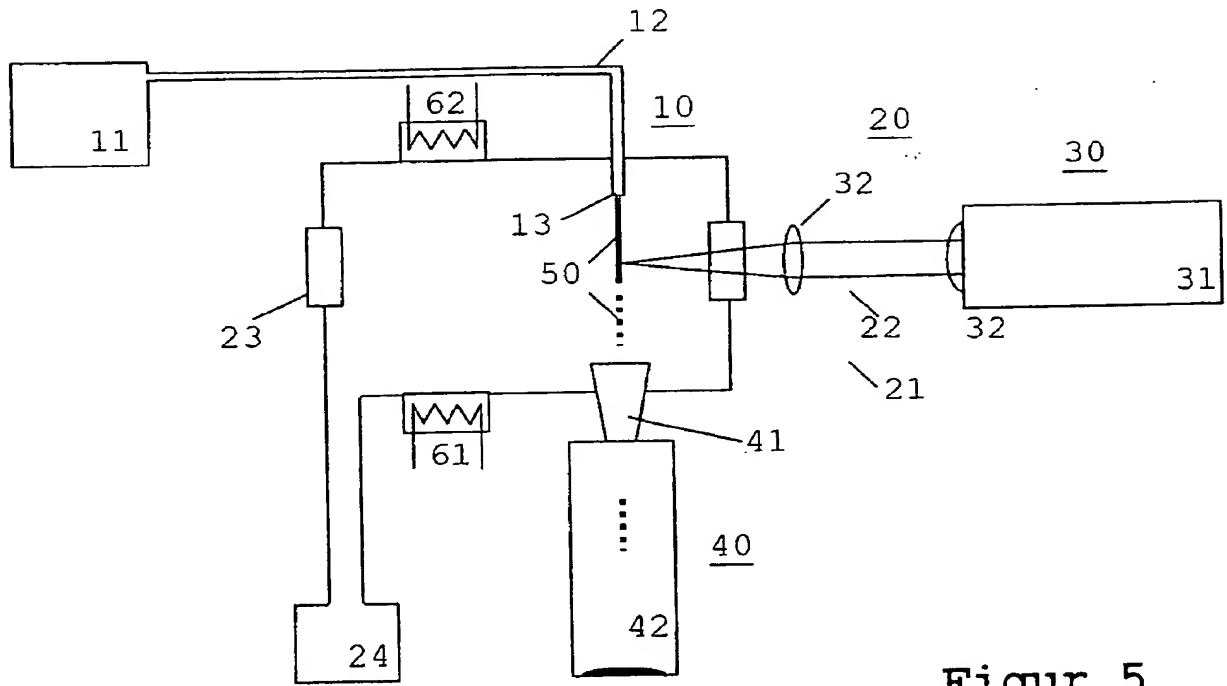
Figur 2



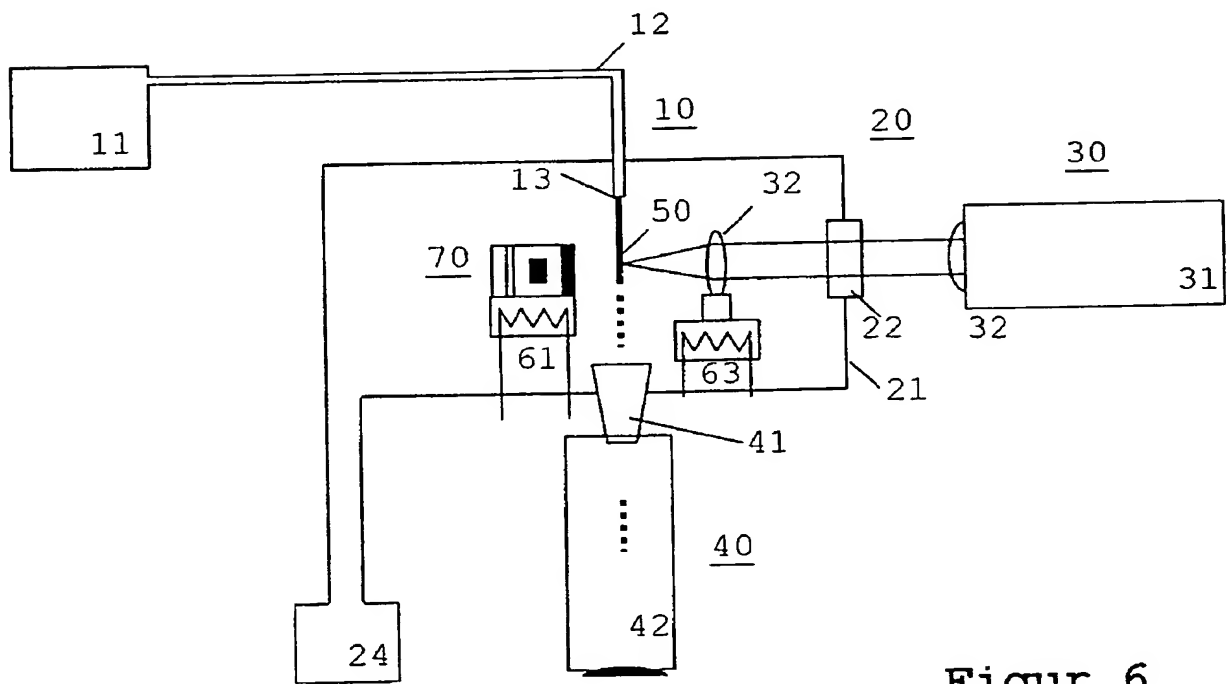
Figur 3



Figur 4



Figur 5



Figur 6